

NGHIÊN CỨU TỔ CHỨC VÀ TÍNH CHẤT LỚP PHỦ Ni-Cr-Cr₃C₂ LÊN THÉP CHẾ TẠO XUPAP

STUDY ON THE MICROSTRUCTURE AND PROPERTIES OF Ni-Cr-Cr₃C₂ COATINGS ON VALVE STEEL

ĐOÀN XUÂN TRƯỜNG¹, NGUYỄN ANH XUÂN², NGUYỄN TIẾN DŨNG^{3*}

¹Viện Cơ khí, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

²Phòng Đào tạo, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

³Phòng Tổ chức - Hành chính, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

*Email liên hệ: dungnt@vimaru.edu.vn

DOI: <https://doi.org/10.65154/jmst.1080>

Tóm tắt

Nghiên cứu tập trung phân tích đặc tính của lớp phủ composite Ni-Cr/ Cr₃C₂ được chế tạo bằng công nghệ phun phủ nhiệt. Kết quả thực nghiệm cho thấy lớp phủ có cấu trúc đặc chắc, ít lỗ xốp, với độ dày trung bình khoảng 180μm. Tổ chức tế vi thể hiện sự phân bố đồng đều của các hạt pha cứng crom cacbit (Cr₃C₂) trong ma trận liên kết Ni-Cr dẻo dai, tạo nên sự liên kết cài răng lược chặt chẽ với vật liệu nền. Về mặt cơ tính, lớp phủ đạt độ cứng vượt trội, dao động từ 677,8 đến 707,1 HV0.3, gấp khoảng 5,2 lần so với nền thép. Mặc dù độ bám dính của hệ mẫu hoàn chỉnh (15,80MPa) thấp hơn so với lớp lót đơn thuần (25,21MPa) do ứng suất nội tại từ pha cứng, giá trị này vẫn đảm bảo yêu cầu làm việc trong điều kiện khắc nghiệt. Đặc biệt, khả năng kháng mài mòn của lớp phủ rất ấn tượng với cường độ mòn trung bình chỉ 4,85 10⁻⁹ kg/N.m. Sự kết hợp giữa độ cứng cao của Cr₃C₂ và khả năng bao bọc của ma trận Ni-Cr đã thiết lập một hàng rào bảo vệ bề mặt ưu việt, giúp giảm thiểu đáng kể sự hao hụt vật liệu do ma sát.

Từ khóa: Thép chế tạo xupap, phun phủ plasma, tổ chức lớp phủ, độ cứng, độ bám dính.

Abstract

This study analyzes the characteristics of Ni-Cr/ Cr₃C₂ composite coatings fabricated using thermal spray technology. Experimental results indicate that the coating possesses a dense structure with low porosity and an average thickness of approximately 180μm. The microstructure exhibits a uniform distribution of chromium carbide (Cr₃C₂) hard particles within a ductile Ni-Cr binder matrix, creating a robust mechanical interlocking bond with the substrate.

Regarding mechanical properties, the coating achieves superior hardness, ranging from 677.8 to 707.1 HV0.3 which is approximately 5.2 times higher than that of the substrate. Although the adhesion strength of the complete coating system (15.80MPa) is lower than that of the bond coat alone (25.21MPa) due to internal stresses from the hard phase, this value remains sufficient for operation under harsh conditions. Notably, the wear resistance of the coating is impressive, with an average wear rate of only 4.85 10⁻⁹ kg/N.m. The synergy between the high hardness of Cr₃C₂ and the encapsulation provided by the Ni-Cr matrix establishes an excellent surface protection barrier, significantly minimizing material loss due to friction.

Keywords: Engine valve steel, Plasma spray coating; microstructure, hardness, adhesion.

1. Mở đầu

Phun phủ ngày càng đóng vai trò quan trọng trong việc chế tạo và phục hồi các chi tiết, đặc biệt là các chi tiết chịu mài mòn. Trong ngành công nghiệp tàu thủy, việc phục hồi các chi tiết trong động cơ tàu thủy có ý nghĩa đặc biệt quan trọng. Trên thế giới và ở Việt Nam cũng đã có một số nghiên cứu về việc phun phủ các chất lên bề mặt các chi tiết [1], [2], [3].

Trong công trình nghiên cứu của mình tác giả Nguyen Van Tuan và cộng sự đã phân tích và xác định được ảnh hưởng của một số thông số công nghệ phun phủ đến tổ chức và đặc tính chống ăn mòn của lớp phủ Cr₃C₂-25NiCr. Kết quả nghiên cứu đã xác định được cải thiện tính chất cơ lý của lớp phun phủ; bằng phân tích về tổ chức tế vi đã xác định được sự biến đổi cấu trúc của cacbit Cr [4]. Trong một công trình nghiên cứu khác cũng chỉ ra cấu trúc điển hình của lớp phun phủ nhiệt khi tạo lớp phủ hỗn hợp

$\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr/Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$, với việc có một lượng oxit nhôm đã thấm thấu vào lớp phủ và giảm được lượng lỗ xốp trong lớp phủ [5].

Kết quả nghiên cứu [6] cho thấy lớp phủ molybdenum (Mo) có độ cứng rất cao (1,700-1,800 HV) và hệ số ma sát thấp (khoảng 0,07), hoạt động như một chất tự bôi trơn hiệu quả ngay cả trong điều kiện khô. Ngược lại, lớp phủ thép có đặc tính ma sát tương đương với thép ban đầu 35CrMo4, với hệ số ma sát giảm đáng kể từ 0,33 xuống 0,07 khi có dầu bôi trơn. Quá trình ủ sau khi phun ở 850°C làm giảm độ cứng của cả hai loại lớp phủ do giảm ứng suất dư và làm tổ chức tế vi đồng nhất. Về độ bám dính, việc xử lý nhiệt có tác động trái ngược: Nó cải thiện đáng kể lực liên kết của lớp phủ thép nhưng lại làm giảm độ bám dính của lớp phủ Mo do sự hình thành các pha trung gian giòn (Mo_2C và MoO_2) tại bề mặt tiếp giáp. Nhìn chung, molybdenum thể hiện khả năng chống mài mòn và độ bám dính vượt trội nhờ nhiệt độ nóng chảy cao và hệ số giãn nở nhiệt thấp, trong khi lớp phủ thép sẽ có ưu thế hơn do quá trình xử lý nhiệt sau phun phủ.

Kết quả nghiên cứu [7] cho thấy hiện tượng ăn mòn sulfid hóa ở các ống tường lò hơi đốt dầu kém chất lượng xảy ra do môi trường đốt thiếu oxy, dẫn đến sự hình thành các lớp vảy gồm oxit kim loại ở bên ngoài và sulfide kim loại ở bên trong,... Việc áp dụng lớp phủ phun plasma hợp kim 50%Ni-50%Cr đã mang lại hiệu quả bảo vệ rõ rệt, giúp giảm tốc độ ăn mòn đáng kể từ khoảng 0,5 mm/năm xuống chỉ còn tối đa 0,03 mm/năm sau 5 năm thực tế. Lớp phủ này có độ dày khoảng 350-400 μm , độ cứng từ 250-350 mHv và hoạt động dựa trên cơ chế tự làm kín, trong đó tro nhiên liệu nóng chảy rồi đông đặc lại trên bề mặt ống, giúp ngăn chặn sự xâm nhập của các thành phần ăn mòn vào bên trong các lỗ rỗng của lớp phủ. Phương pháp này được khẳng định là rất hiệu quả, không làm ảnh hưởng đến hiệu suất truyền nhiệt và có khả năng ứng dụng rộng rãi cho nhiều loại lò hơi công nghiệp khác nhau.

Kết quả nghiên cứu [8] về khả năng kháng oxy hóa hơi nước của lớp phủ 80Ni-20Cr trên nền thép 9Cr-1Mo cho thấy phương pháp phun HVOF tạo ra lớp phủ đặc chắc, ít lỗ rỗng và có hiệu quả bảo vệ vượt trội so với phương pháp APS. Lớp phủ HVOF duy trì khả năng bảo vệ ổn định ở nhiệt độ 600°C và 650°C trong suốt 1.000 giờ thử nghiệm mà không hề xảy ra hiện tượng hình thành vảy oxit sắt tại bề mặt tiếp giáp. Ngược lại, lớp phủ APS do có độ xốp cao nên đã làm tăng sự hình thành của vảy oxit ở nhiệt độ cao, đặc biệt là tại 750°C. Ở điều kiện khắc nghiệt nhất (750°C trong 1.000 giờ), mặc dù không có dấu hiệu bong tróc tại bề mặt, nhưng sự khuếch tán mạnh mẽ của sắt (Fe) từ chất

nền xuyên qua lớp phủ đã dẫn đến sự xuất hiện của trên bề mặt lớp phủ HVOF. Nghiên cứu cũng xác định rằng niken (Ni) và sắt (Fe) khuếch tán tương hỗ với tốc độ gần như tương đương, đồng thời sự hình thành màng ổn định trên bề mặt là yếu tố then chốt giúp ngăn chặn quá trình oxy hóa sâu hơn vào bên trong.

Kết quả nghiên cứu [9] cho thấy lớp phủ 50Ni-50Cr được chế tạo bằng phương pháp phun nhiệt HVOF có độ đặc chắc cao, ít lỗ rỗng và khả năng kháng oxy hóa hơi nước vượt trội so với phương pháp APS trong suốt 1.000 giờ thử nghiệm ở dải nhiệt độ từ 600°C đến 750°C,... Lớp phủ HVOF hình thành một màng hoàn chỉnh trên bề mặt giúp ngăn chặn sự phát triển của vảy oxit. Điểm đáng chú ý là sự hình thành cacbit crom tại bề mặt tiếp giáp giữa lớp phủ và chất nền (đặc biệt ở nhiệt độ từ 650°C trở lên) đã đóng vai trò như một rào cản vật lý, giúp giảm thiểu đáng kể sự khuếch tán tương hỗ của sắt (Fe) từ chất nền vào lớp phủ và niken (Ni), crom (Cr) từ lớp phủ vào kim loại nền. Ngược lại, lớp phủ APS do cấu trúc xốp và có nhiều lỗ rỗng nên hơi nước có thể xâm nhập sâu, gây ra sự hình thành các lớp oxit trên bề mặt lớp phun phủ sau thời gian dài hoặc ở nhiệt độ cao (750°C). Ngoài ra, sau khi oxy hóa hơi nước, cấu trúc của lớp phủ ban đầu từ pha niken (FCC) duy nhất đã chuyển đổi thành cấu trúc hai pha gồm pha FCC giàu Ni và pha BCC giàu Cr.

Kết quả nghiên cứu [10] cho thấy vật liệu nền đóng vai trò quyết định đối với thành phần pha, cấu trúc vi mô và các tính chất cơ lý của lớp phủ plasma Ni-Cr-B-Si-C-Ti-Al,... Lớp phủ trên nền gang có cấu trúc tinh thể phức tạp hơn với sự xuất hiện của các pha boride và silicide đồng thời đạt độ cứng tế vi cao hơn (dao động từ 650-920 HV) so với lớp phủ trên nền thép (600-680 HV). Về khả năng chống mài mòn, trong 30 phút thử nghiệm đầu tiên, cả hai loại lớp phủ đều có tốc độ mài mòn tương đương nhau. Tuy nhiên, từ phút thứ 35 trở đi, lớp phủ trên nền thép lại thể hiện khả năng kháng mài mòn tốt hơn nhờ sự của các pha tăng cường ổn định như -TiAl, TiN. Trong khi đó, nhiệt do ma sát phát sinh trong quá trình thử nghiệm trên nền gang có thể gây ra các biến đổi pha và làm giảm độ bền liên kết giữa các lớp, dẫn đến giảm khả năng chống mài mòn về sau.

Một số nghiên cứu gần đây cũng đã chỉ ra ảnh hưởng của phương pháp phun phủ plasma đến đặc tính bề mặt, tính chống mài mòn và ăn mòn đến một số nhóm thép cacbon trung bình và thép không gỉ 316L [11], [12], [13], [14], [15].

Trong các công trình nghiên cứu trên chưa thấy có nghiên cứu về đặc điểm cấu trúc và tính chất lớp phủ

Ni-Cr/Cr₃C₂ lên thép chế tạo xupap. Trong công trình này trình bày các kết quả nghiên cứu về cấu trúc lớp phun phủ Ni-Cr/Cr₃C₂; ảnh hưởng lớp phủ đến độ cứng; khả năng chống mài mòn cũng như khả năng bám dính của lớp phủ lên nền thép nghiên cứu.

2. Thực nghiệm

Thành phần thép chế tạo xupap được thể hiện ở Bảng 1.

Bảng 1. Thành phần thép 20Cr (% khối lượng)

C	Si	Mn	P	S	Cr
0,18%	0,19%	0,82%	0,035%	0,030%	1,12%

Thép nghiên cứu được phun phủ bằng công nghệ phun phủ plasma với chế độ phun như sau:

- Tạo nhám bề mặt trước khi xử lý phun:
- + Khoảng cách phun tạo nhám: 100mm;
- + Áp lực khí khi phun tạo nhám: 10MPa;
- + Độ nhám bề mặt đạt được: Rz > 50μm.

Sau khi tạo nhám bề mặt mẫu thép được phun lớp lót với khoảng cách phun 100mm; cường độ dòng điện phun là 500A; tốc độ cấp bột 35g/phút.

Hỗn hợp Ni-Cr có thành phần như Bảng 2.

Bảng 2. Thành phần hỗn hợp bột Ni20Cr

Cr	Si	Fe	Mn	Oxit	Ni
19-20	1-2	0,5-1,5	1-2	0,8	Nền

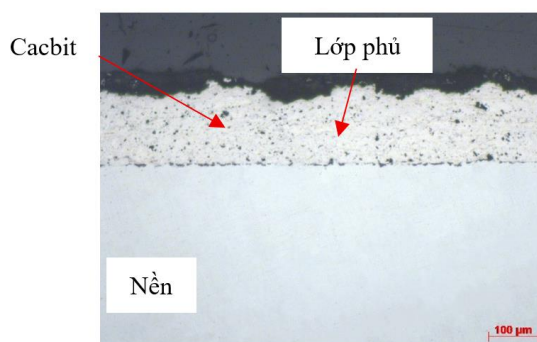
Lớp phủ được phun bằng vật liệu Ni-20Cr có trộn với khoảng từ 65-70% Cr₃C₂. Kích thước hạt bột là: 15-25 μm. Khoảng cách phun là 100mm; cường độ dòng điện phun là 500A; tốc độ cấp bột 35g/phút.

Mẫu sau phun phủ được tiến hành phân tích hiển vi quang học trên máy Axiovert 40MAT; phân tích ảnh SEM và EDS. Ngoài ra mẫu được tiến hành đo độ cứng tế vi trên thiết bị IndentaMet1106. Đo độ bám dính lớp phủ và nền thép trên thiết bị DLR (CHLB Đức) - Viện Kỹ thuật nhiệt đới - Viện Hàn lâm Khoa học & Công nghệ Việt Nam. Mẫu thử mài mòn được thực hiện dạng mẫu dạng tấm tròn và thử theo tiêu chuẩn ASTM G99.

3. Kết quả và thảo luận

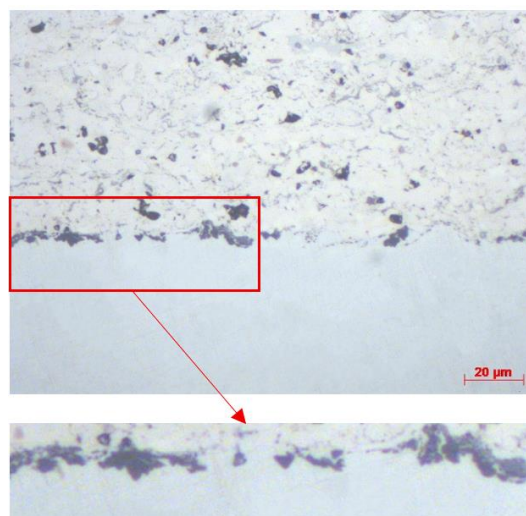
3.1. Tổ chức tế vi lớp phủ

Hình 1 chỉ ra: Tổ chức tế vi của lớp phủ Ni-Cr/Cr₃C₂ thể hiện cấu trúc đặc trưng của phương pháp phun phủ nhiệt với sự phân tách rõ rệt giữa ba vùng: vật liệu nền, lớp phủ và vùng đúc mẫu. Lớp phủ có chiều dày trung bình khoảng 180μm (dựa trên thang đo 100μm), cho thấy độ đồng nhất cao và mật độ đặc



Hình 1. Tổ chức tế vi lớp phủ

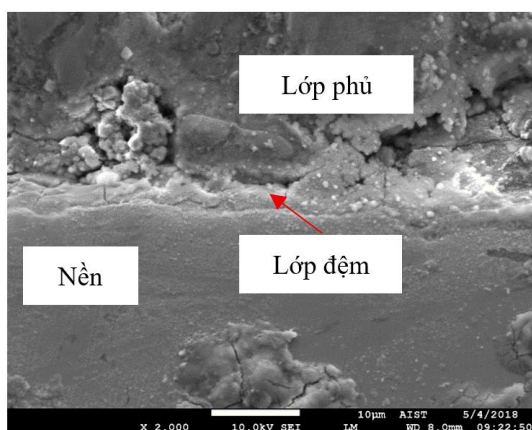
chắc tốt với tỷ lệ lỗ xốp thấp. Trong cấu trúc này, pha nền hợp kim Ni-Cr đóng vai trò là chất liên kết có độ dai cao, bao quanh và giữ chặt các hạt cacbit crom (Cr₃C₂- là các hạt pha cứng có màu tối hơn phân bố rải rác. Sự phân tán đều của các hạt cacbit này giúp lớp phủ đạt được khả năng chống mài mòn cơ học và kháng oxy hóa vượt trội ở nhiệt độ cao. Đặc biệt, phân tích tổ chức giữa lớp phủ và vật liệu nền khá phẳng, liên tục và không xuất hiện các vết nứt hay hiện tượng bong tách, chứng tỏ quá trình chuẩn bị bề mặt và lực bám dính cơ học giữa hai lớp đạt hiệu quả rất tốt.



Hình 2. Tổ chức tế vi vùng lớp phủ

Dựa trên hình ảnh hiển thị mặt cắt ngang tổ chức tế vi của lớp phủ Ni-Cr/Cr₃C₂ ở độ phóng đại lớn hơn (thang đo μm) cho thấy: Một cấu trúc phân lớp đặc trưng với sự liên kết chặt chẽ tại vùng tiếp giáp giữa lớp phủ và vật liệu nền. Lớp phủ thể hiện sự phân bố đồng nhất của các hạt pha cứng cacbit crom (Cr₃C₂ các đốm tối màu) trên nền hợp kim Ni-Cr (pha sáng màu). Tại vùng chuyển tiếp (được phóng lớn trong khung đỏ), cơ chế bám dính cơ học thể hiện rõ nét thông qua sự cài răng lược giữa các hạt vật liệu phun

và bề mặt nền đã được tạo nhám, không quan sát thấy các vết nứt dọc hay hiện tượng tách lớp tại đường biên giới này. Các hạt cacbit giữ được hình thái góc cạnh và kích thước đa dạng, phân tán tương đối đều trong nền của lớp phun phủ, giúp tăng cường khả năng chống mài mòn cho hệ vật liệu. Tuy nhiên, sự xuất hiện của một số lỗ xóp tế vi và biên giới dạng cột mảnh phản ánh quá trình biến dạng dẻo của các giọt kim loại nóng chảy khi va chạm với bề mặt nền trong điều kiện phun phủ nhiệt. Tổng thể lớp phủ có cấu trúc đặc chắc, đảm bảo khả năng bảo vệ bề mặt chống lại các tác nhân xâm thực và mài mòn cơ học.



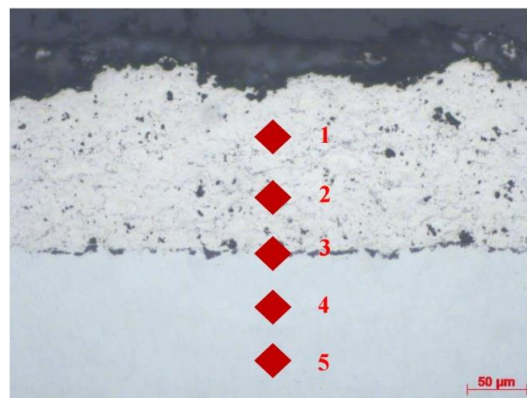
Hình 3. Tổ chức tế vi lớp phủ (phân tích SEM)

Hình thái bề mặt của lớp phủ composite Ni-Cr/Cr₃C₂ thể hiện cấu trúc không đồng nhất đặc trưng của công nghệ phun phủ nhiệt cao tốc. Quan sát ở độ phân giải cao cho thấy sự đập chổng của các hạt vật liệu ở trạng thái nóng chảy và bán nóng chảy, tạo nên các dạng "splats" (dạng lá) biến dạng dẻo khi va chạm với bề mặt nền. Nền Ni-Cr đóng vai trò pha liên kết, bao phủ các hạt pha cứng cacbit (Cr₃C₂) có dạng hình học góc cạnh và kích thước không đồng nhất. Trên bề mặt xuất hiện một số vết nứt vi mô (micro-cracks) và lỗ xóp nhỏ, vốn là hệ quả của ứng suất nhiệt và quá trình co ngót nhanh của vật liệu trong giai đoạn làm nguội sau phun. Tuy nhiên, sự phân bố đan xen giữa các vùng giàu pha cứng và pha nền dẻo tạo nên một cấu trúc bề mặt có độ nhám cơ học cao, giúp làm tăng khả năng kháng mài mòn tốt thông qua cơ chế cản trở sự dịch chuyển của các vết xước cơ học trên bề mặt vật liệu.

3.2. Phân tích cơ tính

Kết quả khảo sát độ cứng vi Vickers (HV0.3) phản ánh sự phân hóa rõ rệt về đặc tính cơ lý giữa các vùng cấu trúc, minh chứng cho hiệu quả gia cường của hệ vật liệu composite Ni-Cr/ Cr₃C₂. Tại khu vực lớp phủ (vị trí 1 và 2), giá trị độ cứng đạt mức cao nhất, dao động

trong khoảng 677,8 HV đến 707,1 HV. Sự gia tăng vượt trội này (gấp khoảng 5,2 lần so với vật liệu nền) được quyết định bởi sự hiện diện của các hạt pha cứng crom cacbit (Cr₃C₂) phân tán đồng đều trong nền Ni-Cr, tạo nên một "lớp vỏ" có khả năng kháng biến dạng dẻo và chống mài mòn cực cao. Tiến dần vào vùng tiếp giáp giữa lớp phủ và kim loại nền (vị trí 3), giá trị độ cứng ghi nhận mức trung gian là 518,7 HV. Đây là kết quả của sự tương tác cơ học và sự thay đổi mật độ pha cứng tại vùng chuyển tiếp giữa vật liệu phun và bề mặt nền. Cuối cùng, tại các vị trí sâu hơn trong lòng vật liệu nền (vị trí 4 và 5), độ cứng giảm mạnh và duy trì ổn định ở mức 134,4 - 136,9 HV. Sự ổn định của giá trị độ cứng ở vùng này cho thấy quá trình phun phủ nhiệt không gây ra các biến đổi tiêu cực về tổ chức tế vi hay hiện tượng ủ mềm làm suy giảm đặc tính cơ học của vật liệu nền. Tổng thể quy luật biến thiên độ cứng khẳng định lớp phủ đã thiết lập và tạo ra lớp bảo vệ bề mặt ưu việt trong khi vẫn bảo toàn được độ dẻo dai ở trong lõi của mẫu nghiên cứu.



Hình 4. Vị trí vết đo độ cứng tế vi

Bảng 3. Kết quả độ cứng tế vi

Vị trí 1	Vị trí 2	Vị trí 3	Vị trí 4	Vị trí 5
707,1	677,8	518,7	136,9	134,4

Bảng 4. Kết quả độ bám dính

	Độ bám dính K, MPa
Lớp lót	25.21
Mẫu hoàn chỉnh	15.80

Kết quả thử nghiệm cơ học về độ bám dính (K) cho thấy sự chênh lệch đáng kể giữa lớp lót Ni-Cr và hệ mẫu hoàn chỉnh Ni-Cr/ Cr₃C₂. Cụ thể, lớp lót đơn lớp đạt giá trị độ bám dính lên tới 25,21 MPa, phản ánh khả năng tương tác cơ học và khuếch tán nhiệt tốt giữa các giọt kim loại Ni-Cr nóng chảy với bề mặt nền đã được tạo nhám. Giá trị này khẳng định vai trò của lớp lót như một vùng đệm dẻo dai, giúp giảm thiểu ứng suất nhiệt và tăng cường liên kết tại giao diện nền - lớp phủ.

Ngược lại, khi chuyển sang mẫu hoàn chỉnh (bao gồm lớp phủ composite chứa pha cứng Cr_3C_2 chồng lên lớp lót), độ bám dính ghi nhận sự sụt giảm xuống còn 15,80MPa. Hiện tượng này có thể được giải thích do sự hiện diện của các hạt Cacbit Crom có độ cứng cao nhưng tính dẻo thấp, làm gia tăng ứng suất nội tại và độ giòn của toàn hệ thống lớp phủ. Thêm vào đó, sự khác biệt về hệ số giãn nở nhiệt giữa pha nền Ni-Cr và pha cứng Cr_3C_2 có thể dẫn đến các vết nứt vi mô tại ranh giới các hạt (splats), gây suy giảm lực liên kết tổng thể của mẫu hoàn chỉnh so với lớp lót thuần túy. Mặc dù có sự sụt giảm, giá trị 15,80MPa vẫn nằm trong ngưỡng chấp nhận được đối với các ứng dụng bảo vệ bề mặt chịu mài mòn trong điều kiện làm việc khắc nghiệt.

Bảng 5. Phân tích cường độ mòn

	Cường độ mòn trung bình tính theo khối lượng (kg/N.m)
Mẫu hoàn chỉnh	$4.85.10^{-9}$

Kết quả khảo sát đặc tính mài mòn cho thấy mẫu hoàn chỉnh lớp phủ Ni-Cr/ Cr_3C_2 sở hữu cường độ mòn trung bình rất thấp, đạt giá trị $4.85.10^{-9}\text{kg/N.m}$. Chỉ số này minh chứng cho khả năng kháng mài mòn vượt trội của hệ vật liệu composite trong điều kiện ma sát khắc nghiệt. Hiệu quả bảo vệ bề mặt này được thiết lập nhờ sự kết hợp tương hỗ giữa ma trận nền hợp kim Ni-Cr dẻo dai và các hạt pha cứng crom cacbit (Cr_3C_2) phân tán.

Trong quá trình làm việc, nền Ni-Cr đóng vai trò bao bọc và ngăn chặn sự bong tróc của các hạt pha cứng, đồng thời hấp thụ năng lượng va chạm và giảm thiểu sự hình thành các vết nứt bề mặt. Ngược lại, các hạt Cr_3C_2 với độ cứng cao (đã được xác nhận qua kết quả đo HV0.3 là 700) đóng vai trò là các điểm chịu lực chính, cản trở sự thâm nhập và cắt gọt của các tác nhân mài mòn lên bề mặt vật liệu. Cường độ mòn ở mức 10^{-9}kg/N.m khẳng định lớp phủ có độ ổn định cấu trúc tốt, tỷ lệ hao hụt vật liệu theo quãng đường trượt là rất nhỏ, đáp ứng hoàn toàn các yêu cầu kỹ thuật cho các chi tiết máy làm việc trong môi trường chịu ma sát hạt rời hoặc mài mòn tiếp xúc cao.

4. Kết luận

Thông qua quá trình khảo sát toàn diện về tổ chức tế vi và tính chất lý hóa, có thể rút ra các kết luận quan trọng về hệ lớp phủ Ni-Cr/ Cr_3C_2 như sau:

Thứ nhất, công nghệ phun phủ nhiệt đã tạo ra một lớp bảo vệ bề mặt có cấu trúc lamellar đặc trưng với mật độ đặc chắc cao và độ đồng nhất tốt. Hình thái các

hạt pha cứng Cr_3C_2 giữ được dạng hình học góc cạnh, phân tán đan xen trong pha liên kết Ni-Cr, tạo nên một cấu trúc composite bền vững. Giao diện giữa lớp phủ và vật liệu nền sạch, không có hiện tượng tách lớp hay nứt dọc, khẳng định quy trình xử lý bề mặt và thông số phun phủ đạt hiệu quả bám dính cơ học tối ưu.

Thứ hai, đặc tính cơ lý của bề mặt chi tiết được cải thiện rõ rệt. Sự phân hóa độ cứng dạng bậc thang từ lớp phủ (700HV) qua vùng giao diện chuyển tiếp (518,7HV) vào đến nền thép (135HV) cho phép chi tiết vừa có bề mặt với độ cứng cao để chống lại các tác nhân xâm thực, vừa giữ được độ dẻo dai bên trong lõi của chi tiết. Mặc dù sự hiện diện của các hạt cacbit làm tăng độ giòn và gây sụt giảm nhẹ độ bám dính hệ mẫu xuống 15,80MPa so với lớp lót đơn lớp, nhưng sự suy giảm này là hoàn toàn có thể kiểm soát và nằm trong ngưỡng kỹ thuật cho phép. Lớp lót Ni-Cr đã đóng vai trò làm vùng đệm trung gian, giúp giảm ứng suất nhiệt và ngăn chặn các vết nứt lan truyền từ bề mặt vào nền.

Cuối cùng, khả năng chống mài mòn cao với cường độ mòn trung bình ở mức $4.85.10^{-9}\text{kg/N.m}$. Cơ chế bảo vệ kép được xác lập: Các hạt Cr_3C_2 đóng vai trò chịu tải và chống lại sự cắt gọt của quá trình mài mòn, trong khi nền Ni-Cr ngăn chặn sự bong tróc hạt và hấp thụ năng lượng va chạm. Kết quả này khẳng định lớp phủ Ni-Cr/ Cr_3C_2 là giải pháp tối ưu cho các bộ phận máy móc thường xuyên làm việc trong môi trường ma sát hạt rời hoặc chịu mài mòn tiếp xúc ở cường độ cao, giúp kéo dài tuổi thọ và nâng cao hiệu quả vận hành của thiết bị.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Hàng hải Việt Nam trong đề tài mã số: **DT25-26.51**.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] V. T. Nguyen et al. (2019), *Arc Thermal Spray NiCr20 Alloy Coating: Fabrication, Sealant, Heat Treatment, Wear, and Corrosion Resistances*, Int. J. Electrochem., Vol.2019.
Doi: 10.1155/2019/8796958.
- [2] L. Q. Cuong et al. (2020), *High-temperature oxidation-resistant nicr/al duplex coating on carbon steel substrate*, Vietnam J. Sci. Technol., Vol.58, No.1.
Doi: 10.15625/2525-2518/57/6/13483.
- [3] S. Matthews, A. Asadov, S. Ruddell, and L. M. Berger (2017), *Thermally induced metallurgical processes in Cr_3C_2 -NiCr thermal spray coatings*

- as a function of carbide dissolution, J. Alloys Compd., Vol.728.
 Doi: 10.1016/j.jallcom.2017.08.246.
- [4] T. Nguyen Van, T. A. Nguyen, Q. Le Thu, and H. Pham Thi (2019), *Influence of plasma spraying parameters on microstructure and corrosion resistance of Cr₃C₂-25NiCr cermet carbide coating*, Anti-Corrosion Methods Mater., Vol.66, No.3.
 Doi: 10.1108/ACMM-09-2018-2003.
- [5] T. Van Nguyen et al. (2022), *Sealing Treatment of Plasma-Sprayed Cr₃C₂-NiCr/Al₂O₃-TiO₂ Coating by Aluminum Phosphate Sealant Containing Al₂O₃ Nanoparticles*.
 Doi: 10.1007/s11666-021-01263-2.
- [6] M. Laribi, A. B. Vannes, and D. Treheux (2006), *On a determination of wear resistance and adhesion of molybdenum, Cr-Ni and Cr-Mn steel coatings thermally sprayed on a 35CrMo4 steel*, Surf. Coatings Technol., Vol.200, No.8, pp.2704-2710.
 Doi: 10.1016/j.surfcoat.2004.12.036.
- [7] M. Nakamori, I. Mizuta, T. Sada, and Y. Furuyashiki (1993), *Sulfidation of Water-Wall Tubes in Low Grades Oil Firing Boilers and Its Prevention by Plasma Spray Coating of Ni-Cr Alloy*, Zairyo-to-Kankyo, Vol.42, No.6, pp.368-376.
 Doi: 10.3323/jcorr1991.42.368.
- [8] T. Sundararajan, S. Kuroda, T. Itagaki, and F. Abe (2003), *Steam oxidation resistance of Ni-Cr thermal spray coatings on 9Cr-1Mo steel. Part 1: 80Ni-20Cr*, ISIJ Int., Vol.43, No.1.
 Doi: 10.2355/isijinternational.43.95.
- [9] T. Sundararajan, S. Kuroda, T. Itagaki, and F. Abe (2003), *Steam oxidation resistance of Ni-Cr thermal spray coatings on 9Cr-1Mo steel. Part 2: 50Ni-50Cr*, ISIJ Int., Vol.43, No.1, pp. 104-111.
 Doi: 10.2355/isijinternational.43.104.
- [10] H. Skulev and D. Veselinov (2022), *The influence of steel and cast iron as substrate materials on the microstructure, microhardness and wear resistance of nickel-base ti-al plasma spray coatings*, Comptes Rendus L'Academie Bulg. des Sci., Vol.75, No.11.
 Doi: 10.7546/CRAABS.2022.11.13.
- [11] I. M. Anghel, D. Uțu, I. Mitelea, A. T. Constantin, and I. D. Uțu (2024), *Surface Characteristics of Vacuum-Plasma-Sprayed Reinforced Stainless Steel Coatings with TiC Particles*, Coatings, Vol.14, No.3.
 Doi: 10.3390/coatings14030289.
- [12] C. D. Prasad et al. (2025), *Characterization and wear behavior of plasma-sprayed hard-faced silicon carbide coatings on AISI 410 steel substrate*, J. Mater. Sci. Mater. Eng., Vol.20, No.1.
 Doi: 10.1186/s40712-025-00286-9.
- [13] J. Radilla, H. Martínez, O. Vázquez, and B. Campillo (2024), *Atmospheric Plasma Treatment to Improve PHB Coatings on 316L Stainless Steel*, Polymers (Basel), Vol.16, No.14.
 Doi: 10.3390/polym16142073.
- [14] H. Hartl, J. Davies, G. Will, K. Ostrikov, and J. MacLeod (2023), *Plasma - enabled superhydrophobic coatings on mild steel*, Sci. Rep., Vol.13, No.1.
 Doi: 10.1038/s41598-022-26695-w.
- [15] K. Sonoya, C. J. Li, G. C. Ji, and Y. Y. Wang (1996), *Abrasion and erosion wear resistance of Cr₃C₂-NiCr coatings prepared by plasma, detonation and high velocity oxyfuel spraying*, Proc. 7th Natl. Therm. spray Conf. Bost., Vol.121, No.1.

Ngày nhận bài:	20/03/2026
Ngày nhận bản sửa:	07/04/2026
Ngày duyệt đăng:	08/04/2026